

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

БІЛОУС ІННА ЮРІЇВНА



УДК 620.91: 697.1

**ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ В УМОВАХ
ДИНАМІЧНОЇ ЗМІНИ ХАРАКТЕРИСТИК СЕРЕДОВИЩА**

Спеціальність 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дешко Валерій Іванович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри теплотехніки та енергозбереження.

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Новосельцев Олександр Вікторович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
провідний науковий співробітник відділу теплофізичних основ енергоощадних технологій;

кандидат технічних наук, доцент
Тимофєєв Микола Васильович,
Державне підприємство «Науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», в.о. завідувача Науково-технічного центру з питань енергоефективності та енергозбереження у сфері будівництва.

Захист дисертації відбудеться «19» лютого 2019 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.20 при Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, вул. Борщагівська, 115, корп. 22, ауд. 316.

З дисертацією можна ознайомитися у Науково-технічній бібліотеці ім. Г.І. Денисенка Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «___» січня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
канд. техн. наук, доцент



А.І. Замулко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні з червня 2017 року набув чинності Закон України "Про енергетичну ефективність будівель" № 2118-VIII. Підвищення рівня енергоефективності житлово-комунального комплексу включає розробку нормативної бази, організаційних, техніко-економічних, технологічних аспектів виробництва, розподілу, транспортування та споживання енергії. Споживання енергії є найбільш впливовим напрямком реалізації комплексу енергозберігаючих заходів. Тому актуальним є розвиток досліджень, які стосуються енергетичних систем комунальної енергетики, спрямований на кінцевого споживача.

Понад 40% світового енергоспоживання припадає на будівлі, зростають вимоги до ефективного використання енергії в них, перш за все на опалення та/або охолодження, одним з ключових показників якого є енергетична потреба. Сучасні тенденції, які знаходять відображення у зміні міжнародних норм і стандартів, розглядають будівлі як складні енергетичні системи в комплексі огорожувальних конструкцій та інженерних систем, з джерелами енергопостачання, внутрішнім та зовнішнім середовищем.

Адекватність оцінки рівня енергоефективності будівель, деталізація показників енергетичного стану у значній мірі залежать від використання математичних моделей будівлі, складність яких визначається задачами, що вирішуються при проектуванні, модернізації, сертифікації та експлуатації будівель.

Незважаючи на постійний розвиток математичних моделей енергетичного стану будівель, науковий досвід і досягнення в даному напрямку, постійної уваги потребують проблеми удосконалення та застосування сучасних методів енергетичного оцінювання будівель, враховуючи кліматичні умови, поточні завдання в сфері енергоефективності, експлуатаційний стан та технологічний рівень національного фонду будівель. Це обумовлює актуальність дисертаційної роботи, наукова задача якої полягає у розробці та розвитку математичних моделей та напрямків їх застосування при визначенні енергетичних характеристик будівель та оцінці енергоефективності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі теплотехніки та енергозбереження Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", відповідно до напрямку "Енергетика та енергоефективність" Закону України "Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки" та Законів України "Про енергозбереження", "Про енергетичну ефективність будівель". Матеріали дисертаційної роботи використано під час виконання держбюджетних НДР: "Розробка комплексу науково-технічних рішень для створення системи енергоменеджменту закладів освіти МОН України" (№ держреєстрації 0115U000313, 2014-2016 рр.); "Управління енергоспоживанням об'єктів комунальної сфери" (№ держреєстрації 0117U000469, 2016-2018 рр.); "Розробка моделей та методів інтегрованих систем управління ефективністю енерговикористання об'єктів галузі освіти" (№ держреєстрації 0113U001575, 2013-2014 рр.), госпдогорівних НДР: "Науковий супровід проекту УФСІ підвищення якості освіти послуг бюджетних закладів Кіровоградської та Вінницької обл. Методика енергоаудиту." (№ 11 від 15.12.2014), "Розробка методики проведення енергетичного аудиту по програмі УФСІ" (№ 2 від 23.10.2015).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності управління використанням енергії на основі деталізації показників, розробки та удосконалення методів та засобів моделювання енергетичного стану будівель, у тому числі врахування сукупності часової мінливості погодних та експлуатаційних факторів в динамічних сіткових моделях будівель.

Реалізація поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

- провести аналіз методів визначення та підвищення ефективності управління споживанням енергії в енергетичних системах будівель;
- розробити сукупність математичних моделей енергетичного стану та провести їх порівняння для вирішення різних задач в сфері управління енергоспоживанням будівель;
- визначити вагомості впливу мінливості сукупності погодних та експлуатаційних факторів на динаміку енергопотреби будівель;
- провести експериментально-розрахункову діагностику локального та часового розосередження характеристик, що впливають на тепловий комфорт будівлі;
- визначити ефективність переривчастого опалення з врахуванням теплової інерційності будівель та мінливості погодних умов;
- застосувати математичні моделі для енергетичної сертифікації будівель закладів соціальної сфери.

Об'єкт дослідження – процес оцінювання енергоефективності в умовах динамічної зміни характеристик середовища.

Предмет дослідження – методи і способи оцінювання показників енергетичної ефективності громадських будівель з використанням математичних моделей.

Методи дослідження. Методичну основу проведеного наукового дослідження склали такі методи: аналізу та синтезу, математична статистика, методи математичного та імітаційного моделювання, фундаментальні положення теорії тепломасообміну, системний підхід з урахуванням температурно-погодних та експлуатаційних факторів, експериментальні методи визначення розподілу температур в приміщеннях будівлі, динамічні комп'ютерні методи енергетичного моделювання будівлі (BEM) як складної системи.

Наукова новизна одержаних результатів дослідження полягає у наступному:

- вперше запропоновані методологічні основи та створені математичні моделі для визначення енергетичних характеристик будівель, які відрізняються поєднанням сучасних комп'ютерних методів енергетичного моделювання будівлі як складної системи, регресійного аналізу, історії зміни і групування сукупності внутрішніх та зовнішніх факторів впливу, що дозволяє прогнозувати та регулювати опалення з урахуванням інерційності будівель до зміни погодних умов та умов експлуатації;
- удосконалено нестационарну сіткову модель визначення теплового стану будівель за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огорожень будівлі, що дозволяє зменшити розбіжність визначення енергопотреби будівлі у режимах опалення та/або охолодження в умовах країн з різкоконтинентальним кліматом;
- розвинено підхід до аналізу режимів переривчастого опалення шляхом визначення надбавки навантаження на опалення в робочі години для оптимальних глибин пониження температури в неробочі години, що дозволило забезпечити комфортний рівень температури в приміщенні в робочі години і визначити показники ефективності переривчастого опалення громадських будівель в нестационарних режимах;
- науково обґрунтовано та розвинуто комплексний підхід до поглибленого аналізу теплоенергетичного стану будівлі, який реалізується на основі поєднання експериментальних методів визначення розподілу температур в приміщеннях будівлі та математичних моделей локального та часового розосередження характеристик, що дозволяє визначити фактичні енергетичні характеристики (розподіл навантаження на систему опалення та кратності повітрообміну), в умовах нестационарних режимів зміни теплового стану будівлі;

- запропоновано нову енергетичну шкалу на 14 класів для сертифікації будівель громадських закладів, розташованих у невеликих містах та селах, що ґрунтується на визначених реперних точках питомої енергопотребі та дозволяє провести оцінку енергоефективності будівель при реалізації енергозберігаючих проектів з врахуванням особливостей розташування та функціонування об'єктів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що запропоновані підходи дозволяють підвищити енергоефективність управління енергоспоживанням у будівлях. Розроблені математичні моделі для аналізу енергетичного стану будівлі дозволяють прогнозувати температурний стан приміщень та/або рівень опалення в приміщеннях з врахуванням динамічних особливостей огорожень та часової зміни погодних та експлуатаційних особливостей. В цілому для громадського сектору будівель України застосування речимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії - до 3,6 млн. Гкал.

Для Українського Фонду Соціальних Інвестицій (УФСІ) виконано аналіз споживання енергії будівель закладів соціальної сфери та запропоновані підходи до їх енергетичної сертифікації. Результати передані до використання в ДП «НДІ будівельних конструкцій», службами енергетичного менеджменту СумДУ та КПІ ім. Ігоря Сікорського. Отримані результати використовуються у навчальному процесі на кафедрі теплотехніки та енергозбереження КПІ ім. Ігоря Сікорського для викладання дисциплін "Методи енергомоніторингу та енергоаудиту", "Енергозбереження в будівлях", "Математичне моделювання енергетичних процесів в антропогенному середовищі". Отримано акти впровадження результатів дисертаційної роботи та свідоцтво авторського права.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення і результати, наведені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. У друкованих працях, які були опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: проведено класифікацію підходів та програмних продуктів для аналізу енергетичних характеристик будівель [1, 8]; проведено порівняння математичних моделей для визначення енергопотребі будівель на опалення та охолодження [2, 3, 6, 17, 18] та особливості використання різних кліматичних баз даних [9]; досліджені переривчасті режими опалення та визначено рівень енергозбереження [8, 16]; виконано параметричний аналіз внутрішніх та зовнішніх факторів впливу на внутрішню температуру повітря та створено багатофакторні регресійні залежності для прогнозування внутрішньої температури повітря та/або рівня опалення [4, 5]; змодельовано комплексний вплив сонячної радіації та власного теплового випромінювання огорожень на внутрішню температуру повітря та рівень опалення в кімнаті [12, 13]; досліджено температурний стан приміщень навчального корпусу та проведено комплексне дослідження енергетичних характеристик будівлі [10, 7, 19, 21]; застосовано динамічні методи розрахунку для аналізу найбільш поширених енергозберігаючих заходів в будівлях [14, 15]; запропоновано шкалу енергетичної сертифікації будівель з врахуванням особливостей розташування та функціонування [11, 20].

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень, представлені в дисертації, були висвітлені на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародній науково-технічній конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (Тернопіль, 2012, 2018), Международном форуме для устойчивого развития бизнеса "Green Mind" (Київ, 2013), Международной научно-практической конференции «Энергосберегающие технологии теплогазоснабжения, строительства и муниципальной инфраструктуры»

(Харків, 2013), International Green Energy Conference (Київ, 2013), Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (Київ, 2014, 2016, 2017, 2018), Міжнародній науково-технічній та навчально-методичній конференції "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REMS" (Київ, 2015, 2016, 2018), Міжнародній конференції "Проблеми промислової теплотехніки" (Київ, 2015, 2017), Міжнародній науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 2016, 2017), Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (Одеса, 2016), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Сучасні інноваційно-інвестиційні механізми розвитку національної економіки" (Полтава, 2015), II International Scientific-Technical Conference "Actual problems of power engineering, construction and environmental engineering" (Poland, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Буд-Майстер-Клас-2017» (Київ, 2017), Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Наукові підсумки 2017 року" (Вінниця, 2017), Міжнародній науково-практичній конференції "Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем" (Чернігів, 2018), Міжнародній науково-технічній конференції «Технології та інфраструктура транспорту» (Харків, 2018), Всеукраїнській науково-технічній конференції «Енергоефективність у будівництві. Сучасні конструктивні системи, ефективні матеріали та інженерне обладнання» (Київ, 2014), Всеукраїнському конкурсі "Молодь енергетики України: відкритий конкурс молодих вчених та енергетиків" (Київ, 2010, 2013, 2016). Представлені на конкурсі роботи здобули призові місця.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображено у 44 наукових працях, у тому числі – 14 у наукових фахових виданнях (з них 6 у виданнях іноземних держав; 4 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 3 – в інших наукових виданнях (з них 2 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз) та у одній колективній монографії, одному свідоцтві про реєстрацію авторського права на науковий твір, 25 тезах доповідей у збірниках матеріалів конференції, з яких 1 у виданні іноземної держави.

Структура і обсяги дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Загальний обсяг роботи складає 236 сторінки, у тому числі, 186 сторінок основного тексту, 76 рисунків, 9 таблиць, список використаних джерел зі 198 найменувань та 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також наведено відомості, апробацію, впровадження та публікації.

У **першому** розділі розглянуті сучасні тенденції використання математичного моделювання енергетичного стану та визначення енергоефективності будівель. В загальному енергобалансі країни основним споживачем первинних ресурсів є житлово-комунальний комплекс, а основна частина витрат припадає на споживання теплової енергії.

Зниження витрати енергоносіїв на опалення будівель може досягатися шляхом використання: сучасних теплоізоляційних матеріалів та технологій на стадіях як проектування так і експлуатації; відновлювальних та альтернативних джерел енергії в системах розосередженої генерації; автоматичного керування системами теплопостачання будівель (локальне керування теплоспоживанням); впливу на соціальний фактор, умови експлуатації, управління поведінкою користувачів.

Системи енергопостачання району/групи будівель є підсистемою енергопостачання міста/регіону, елементи якої можуть бути розділені на системи нижчого порядку (наприклад, будівля). Спираючись на праці Табунщикова Ю.А. та інших дослідників, положення ДСТУ Б EN ISO 13790:2011, ДСТУ Б EN 15217:2013, ДСТУ EN 15603:2013, будівля, як складна енергетична система, розглядається як сукупність інженерних систем, оболонки, енергетичних процесів в приміщеннях під впливом зміни характеристик зовнішнього середовища та людини, як індикатора та замовника умов комфортності в будівлі.

Методи оцінки та підвищення енергоефективності будівель стали об'єктом дослідження в працях іноземних дослідників Ю. Табунщикова, В. Богословського, W. Perera, M. Mijskowski, P. Narowski, L. K. Norford, J.C. Lam, H.C.M. Sam та ін; українських науковців Г. Фаренюка, Н. Фіалко, В. Дешка, В. Маляренка, Б. Баска, Б. Давиденка, С. Дубовського, П. Круковського.

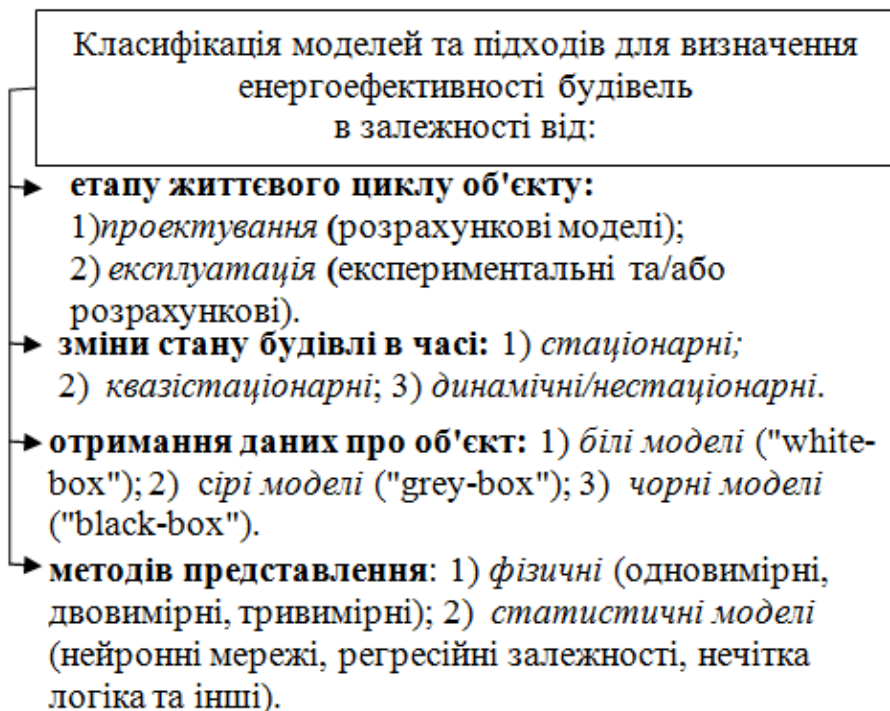


Рис. 1 – Класифікація моделей та підходів для визначення енергоефективності будівель

Для забезпечення та оцінки енергоефективності будівель потрібно вирішити ряд задач, які потребують адекватної моделі розрахунку (рис. 1).

Для оцінювання енергоефективності можуть використовуватись математичні моделі на різних етапах життєвого циклу будівлі. В країнах ЕС енергетичне моделювання будівель використовується як на стадіях проектування, так і експлуатації, для України актуальною є розробка моделей для вже існуючих будівель. Тривалий час енергетичні характеристики будівель

визначалися для річних/сезонних інтервалів розрахунку (стаціонарний розрахунок). Сучасні тенденції розвитку математичних моделей для визначення енергетичного стану будівлі спрямовані на зменшення часових інтервалів та в напрямку визначення локалізації характеристик системи і впливу факторів. Математичні моделі будівлі можуть бути побудовані на основі рівнянь фізичних процесів (так звані, білі моделі), на основі статистичного аналізу отриманих фактичних дани (чорні моделі), а також поєднувати ці підходи (сірі моделі), що підвищує якість моделювання.

Сучасні підходи енергетичного моделювання будівель (Building Energy Modeling - BEM) використовують комп'ютерні засоби (наприклад EnergyPlus, TRNSYS та інші), що дозволяють прогнозувати та деталізувати показники енергоефективності на основі погодинних даних типового метеорологічного року, а також графіків експлуатації будівель для аналізу проектів та різних енергозберігаючих заходів. BEM аналізує будівлю як енергетичну систему, що дозволяє комплексно оцінювати динамічні процеси в будівлі.

Крім того, в стандартах передових країн в сфері енергоефективності будівель, які вводяться в Україні, знайшов відображення розвиток моделей, які спрямовані на зменшення часового інтервалу розрахунку. Одним з кінцевих елементів оцінки ефективного використання ресурсів в будівлях є енергетична сертифікація, де клас енергоефективності встановлюється на основі питомих значень енергопотреб, для визначення яких потрібні математичні моделі. Також сертифікат характеристики енергетичного стану будівлі включає еталонні значення нормативних і фактичних показників.

На основі виконаного аналізу методів до будівлі як енергетичної системи, сформовано мету та наукові завдання, що визначили структуру і зміст наступних розділів.

Другий розділ присвячений розробці математичних моделей для визначення теплового стану та енергопотреб будівель.

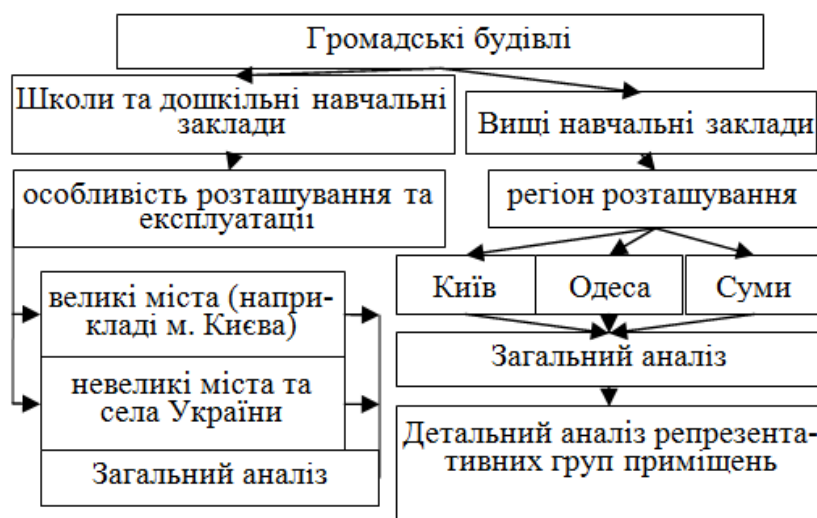


Рис. 2 – Об'єкти дослідження

Проведено аналіз характеристик та моделювання енергетичного стану для громадських об'єктів різної складності, регіонального розміщення та року побудови, умов експлуатації (рис. 2).

Для оцінки енергоефективності будівель використовують різні моделі в залежності від задач, що вирішуються. Для енергетичного аналізу в інвестиційних проектах - стаціонарні і квазістаціонарні моделі. В умовах керування та детального вивчення енергетичних характеристик об'єкту - динамічні моделі. Створено, досліджено та розвинено математичні моделі: за КТМ-204, міжгалузевими нормами, метод градусодіб (ГД) за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007, квазістаціонарний метод ДСТУ Б А.2.2-12:2015, динамічний метод EN 13790 (5R1C), авторські моделі: 1) модифікація динамічної сіткових моделей 5R1C до 8R2C; 2) на базі програмного продукту EnergyPlus; 3) багатофакторні регресійні моделі, які враховують вплив історії зміни вихідних параметрів.

За укрупненими показниками стандарту КТМ-204, за якими і сьогодні проводяться розрахунки в Україні, опалювальна характеристика будівель масової забудови обирається в залежності від призначення, року забудови та об'єму, і розраховується річна потреба на опалення. Дана методика укрупнено враховує теплофізичні особливості огороження, сонячні теплонадходження без врахування орієнтації будівлі та площі застління. Також існують міжгалузеві норми для громадських будівель без термомодернізації (що становлять основну частину будівель) на потребу в опаленні.

За укрупненими показниками стандарту КТМ-204, за якими і сьогодні проводяться розрахунки в Україні, опалювальна характеристика будівель масової забудови обирається в залежності від призначення, року забудови та об'єму, і розраховується річна потреба на опалення. Дана методика укрупнено враховує теплофізичні особливості огороження, сонячні теплонадходження без врахування орієнтації будівлі та площі застління. Також існують міжгалузеві норми для громадських будівель без термомодернізації (що становлять основну частину будівель) на потребу в опаленні.

Метод ГД дозволяє проводити корегування фактичного енергоспоживання до базових умов. Проводити розрахунок для різної зовнішньої та внутрішньої температури повітря, кількість опалювальних діб та інше. Спрощений варіант методу ГД знайшов своє застосування в національному стандарті ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 та дозволяє проводити розрахунки для річних часових інтервалів. В методиці враховуються теплофізичні та геометричні особливості огорожень, сонячні, внутрішні додаткові теплонадходження та інше.

Квазістаціонарний метод розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015, що включає визначення потреби на опалення, охолодження, ГВП, базується на визначенні місячних показників. Цей метод укрупнено враховує теплоінерційні особливості огорожень.

Застосування динамічних методів призводить до збільшення дискретизації інтервалів, складності моделей та обсягів розрахунків, використовується для зон, репрезентативних примі-

щень і будівлі в цілому. Нормативний динамічний метод роз-

рахунку за стандартом ДСТУ Б EN ISO 13790:2011 базується на погодинному методі розрахунку енергопотреб. В стандарті запропонована сіткова модель – п'ять опорів, одна ємність (5R1C). На рис. 3 наведено спрощену схему реалізації методу для окремої зони. Енергопотреб на опалення знаходяться за розрахунковим значенням потужності опалення чи охолодження для кожної години, $\Phi_{HC,nd}$, що повинна бути надана до/або відібрана з вузла температури внутрішнього повітря, θ_{air} , для підтримання певної заданої температури. Теплопередача вентиляцією, H_{ve} , прямо пов'язана з вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , та вузлом, що відображає температуру припливного повітря, θ_{sup} . Теплопередача трансмісією поділяється на частину через світлопрозорі отвори, $H_{tr.w}$, з нульовою тепловою масою, та решту через $H_{tr.ms}$, з тепловою масою, яка, в свою чергу, поділяється на дві частини: $H_{tr.em}$ та $H_{tr.ms}$. Сонячні та внутрішні теплові надходження розподіляються між вузлом температури внутрішнього повітря, θ_{air} , центральним вузлом, θ_s (функція θ_{air} та середньої радіаційної температури θ_r) та вузлом, що представляє масив зони будівлі, θ_m . Теплова маса відображується питомою теплоємністю, C_m , загальною для внутрішніх та зовнішніх огорожень, розрахована за стандартом EN 13786.

Модифікація динамічної сіткової моделі 5R1C до моделі 8R2C, дозволяє розділити внутрішні та зовнішні непрозорі огороження, а саме визначення температури та інерційність поверхонь, інерційність та врахувати власне теплове випромінювання внутрішніх поверхонь огорожень, що збільшує точність розрахунків, особливо для різкоконтинентальних кліматичних умов.

Створена математична модель на базі програмного продукту EnergyPlus (далі E+). Опис динамічної моделі в E+ наведений в табл. 1.

Представлено узагальнення методики визначення кратності повітрообміну, що залежить від таких даних, як швидкість вітру, поверховість, орієнтація кімнати (навітряна чи підвітряна сторона), щільність вікон, на основі методик ASHRAE та інших дослідників.

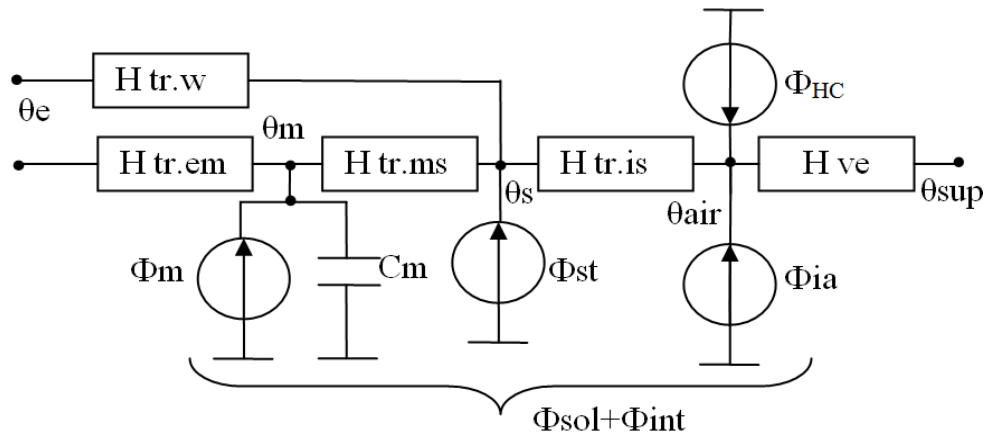


Рис. 3 – Динамічна сіткова модель кімнати, п'ять опорів, одна ємність (5R1C)

Таблиця 1 – Опис динамічної моделі в EnergyPlus

Вхідні дані	Результати	Особливості
1. геометрія створюється на базі графічних редакторів GoogleSketchUp або Design Builder; 2. задаються: 1) теплофізичні властивості багат шарового огородження, 2) віконні конструкції з оптичними особливостями скління, 3) інженерні системи, 4) графік роботи та температурні режими роботи та інше; 3. використовує погодинні кліматичні дані типового року міжнародного погодного файлу IWEC.	дозволяє отримувати: 1. температуру повітря, 2. радіаційну температуру поверхонь, 3. навантаження на систему опалення/охолодження та вентиляцію (HVAC-систему).	1. розрахунок з 10 хв. кроком; 2. дозволяє окремо враховувати теплоємність внутрішніх та зовнішніх огорожень; 3. враховує інженерні системи будівлі та їх інерційність; 4. враховує динаміку мінливості кліматичних даних.

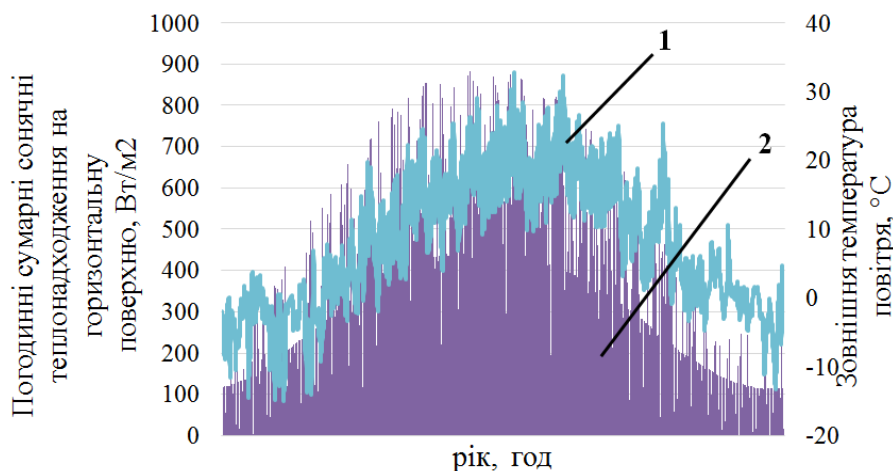


Рис. 4 – Погодинна зміна сонячних теплових навантажень на горизонтальну поверхню (2) та зовнішньої температури повітря (1) для м. Києва з Міжнародного кліматичного файлу IWEC

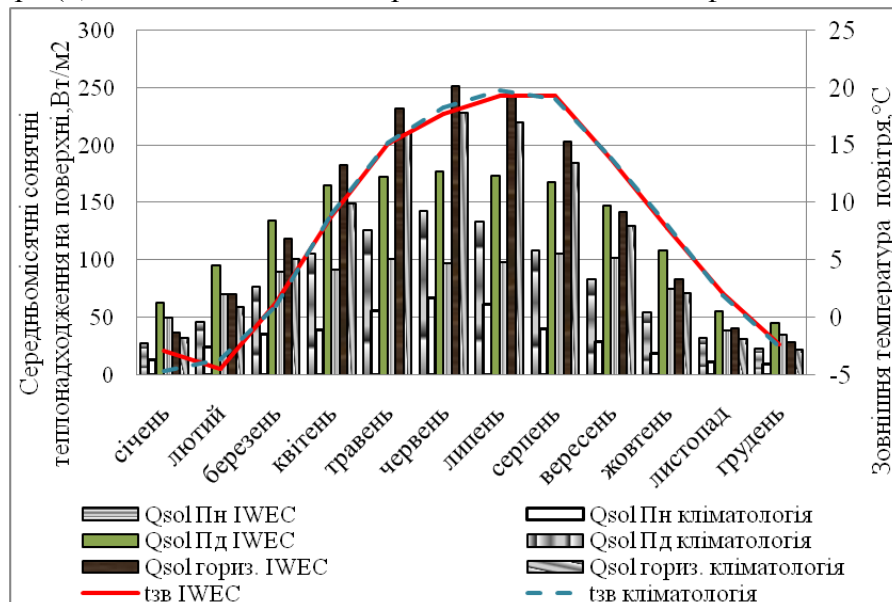


Рис. 5 – Середньомісячні кліматичні дані з нормативних документів України (кліматологія) та Міжнародного погодного файлу (IWEC)

В нормативних кліматологічних даних, що діють в Україні, наведені середньомісячні значення зовнішньої температури повітря та сонячних теплових навантажень на вертикальні та горизонтальну поверхні, що є достатнім при стаціонарному та квазістаціонарному методі розрахунку. При розрахунку енергетичної потреби будівель на опалення та/або охолодження динамічними методами потрібні погодинні кліматичні значення (рис. 4).

Використані методики: Даффі та деталізовану з програмного продукту E+, – перерахунку на вертикальні поверхні погодинних даних сонячних теплових навантажень заданих для горизонтальних поверхонь з міжнародного кліматичного файлу погоди IWEC та проведено порівняння отриманих результатів, усереднених помісячно, з нормативною кліматологією України для міст Києва та Одеси (рис. 5 для м. Київ).

Встановлено, що зовнішня температура повітря за двома кліматологічними базами майже не відрізняється (рис. 5). Відмінність сонячних теплових навантажень на вертикальні поверхні становить близько 40% в зимовий період та 30% в літній для Ки-

ева; для Одеси - до 50%. Сонячні теплонадходження на горизонтальну поверхню відрізняються на 5-10%. Зроблено висновок про необхідність уточнення та доповнення

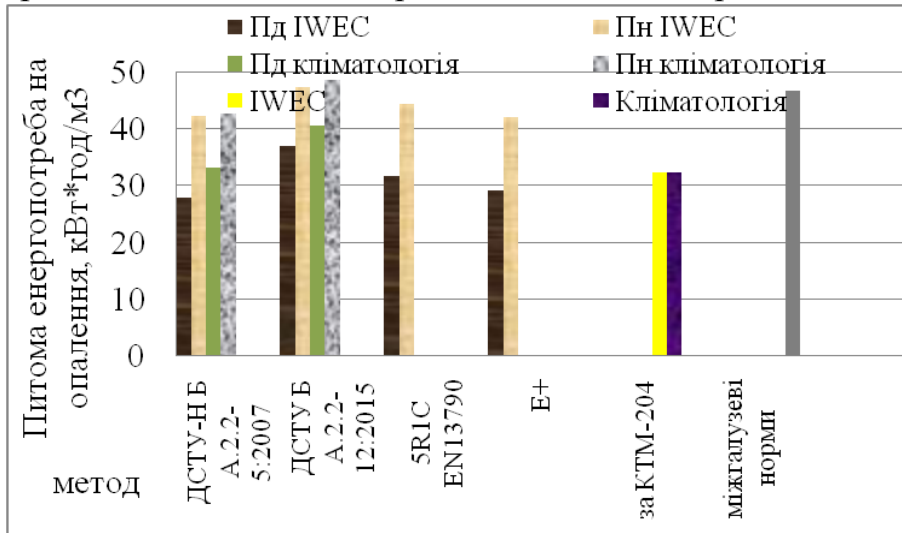


Рис. 6 – Річна питома енергопотреба в опаленні за різними методами та базами погодних даних для м. Києва

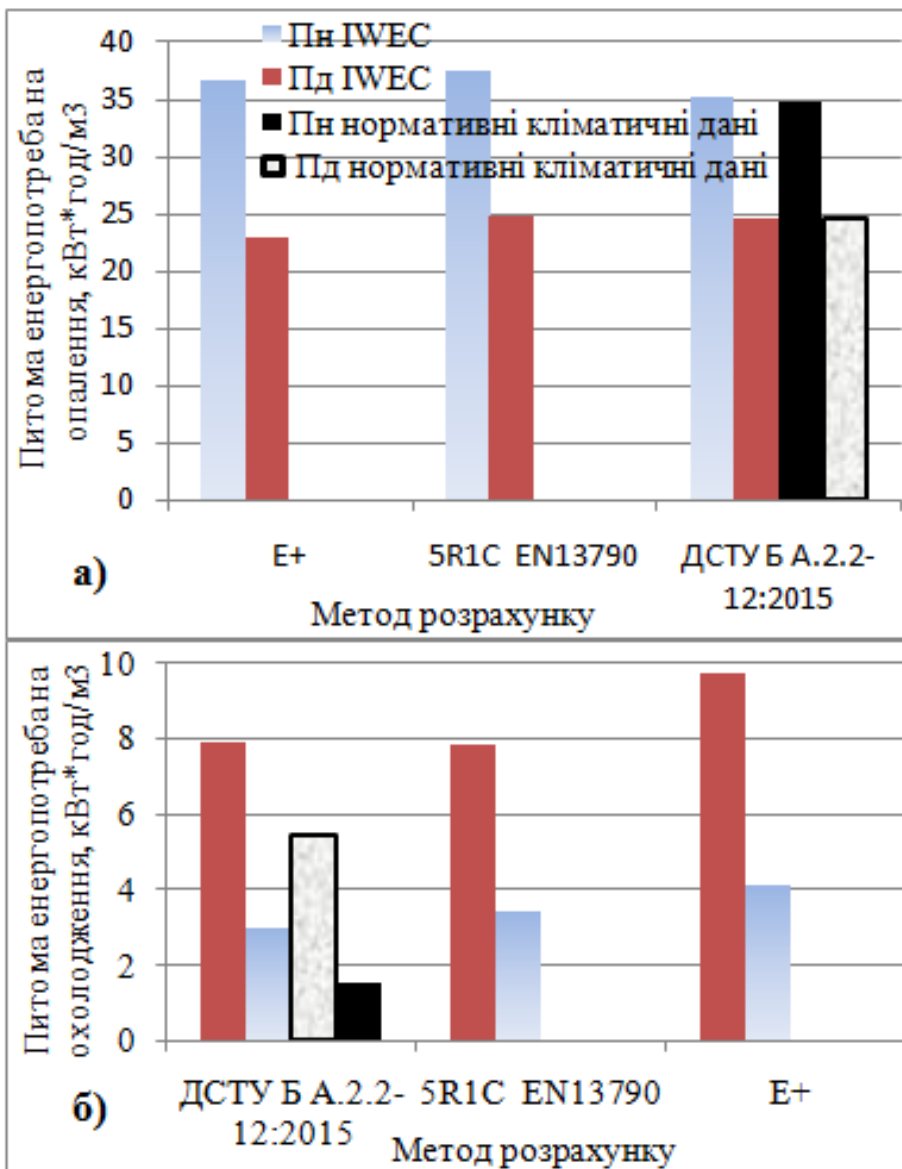


Рис. 7 – Річна питома енергопотреба на опалення (а) та охолодження (б) для будівлі у м. Одеса за різними методами та базами погодних даних

даних Будівельної кліматології України для динамічного погодинного розрахунку енергопотреби.

Перевірка адекватності моделей, що розглядаються в роботі, проведена для визначення енергопотреби будівлі для холодного періоду року та для визначення внутрішньої температури повітря в приміщенні для теплого періоду року. В першому випадку за еталонне значення обрана математична модель, реалізована на базі E+ для перевірки та тестування моделі 5R1C. Для теплого періоду року внутрішня температура за 5R1C порівнювалась з результатами Ю. Табунщикова. Розбіжність даних з перевірочними становить менше 5%.

Третій розділ присвячений оцінюванню енергетичного стану будівлі для різних часових інтервалів розрахунку з застосуванням математичних моделей до аналізу зовнішніх та внутрішніх факторів впливу.

Проведено порівняння математичних моделей для визначення енергопотреби для двох міст: м. Київ - І температурна зона, м. Одеса - II температурна зона. В аналізі об'єктом дослідження

обрано репрезентативні приміщення ВНЗ, в м. Києві - КПІ ім. Ігоря Сікорського, навчальний корпус № 22, в м. Одесі будівля з аналогічними експлуатаційними та теп-

лофізичними характеристиками. Для м. Києва енергопотреба будівлі розрахована лише на опалювальний період, рис. 6, для м. Одеси передбачено період охолодження, рис. 7.

При порівнянні за еталонну обрано модель побудовану на базі E+. Динамічні моделі за E+ та 5R1C (погодинний розрахунок) дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність до 4-8%, в режимі охолодження – до 16-18% з даними кліматології IWEC. Це пояснюється тим, що модель 5R1C враховує масивність будівлі через один приведений вузол внутрішніх та зовнішніх огорожень на відміну від E+, де вузли огорожень розділені. Для періоду опалення за результатами стаціонарного, ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007, та квазістаціонарного, ДСТУ Б.А.2.2-12:2015, методів розрахунку, відповідно має місце відмінність до 15% та 15-25% (використані дані будівельної кліматології України); до 10% та 10-20% (дані IWEC), а для охолодження за квазістаціонарним методом – 20-30% (дані будівельної кліматології України) та до 10% (IWEC). На рис. 8 наведені дані погодинного розрахунку питомої потреби на опалення кімнати в м. Києві, орієнтованої на Пд для середньодобових та середньомісячних значень за моделлю 5R1C та результати, отримані на базі методики розрахунку ДСТУ Б А.2.2-12:2015.

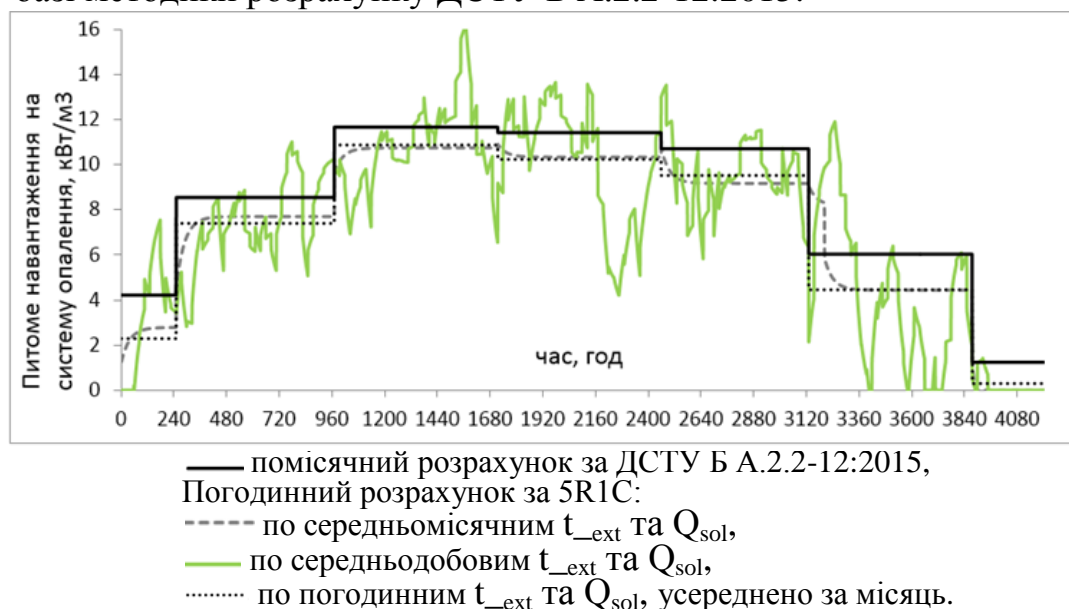


Рис. 8 – Погодинна зміна питомого рівня опалення протягом опалювального періоду для приміщення орієнтованого на Пд

Дані річної потреби в опаленні за моделлю 5R1C на базі погодинного розрахунку зміни рівня опалення: для погодинних значень (не наведено на рис. 8) та для середньодобових та середньомісячних значень t_{ext} та Q_{sol} практично

не відрізняється між собою, але в останньому варіанті немає можливості аналізувати регулювання системи опалення протягом доби.

При погодинному розрахуку енергопотреби для погодинних кліматичних даних, мають місце години відключення опалення в період максимальної добової сонячної активності. Результати погодинної питомої енергопотреби в опаленні по помісячним значенням погодних умов за моделлю 5R1C мають плавні зони-переходи між місяцями, що пов'язано з впливом теплоінерційних особливостей огорожень в моделі, на відміну від розрахунку за ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Середньомісячне теплове навантаження на систему опалення за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 на 15% більше в порівнянні з результатами за моделлю 5R1C.

Для ефективного управління/регулювання системами теплопостачання енергопотреба повинна розраховуватись для малих інтервалів часу, тобто на базі динамічних моделей, які потребують великої кількості вихідних параметрів та складного підлаштування моделі до фактичних умов. Альтернативним варіантом є застосування регресійних моделей для короткострокових прогнозів поведінки будівлі як енергетичної системи. Аналіз показав, що використання для цього фактичних даних не

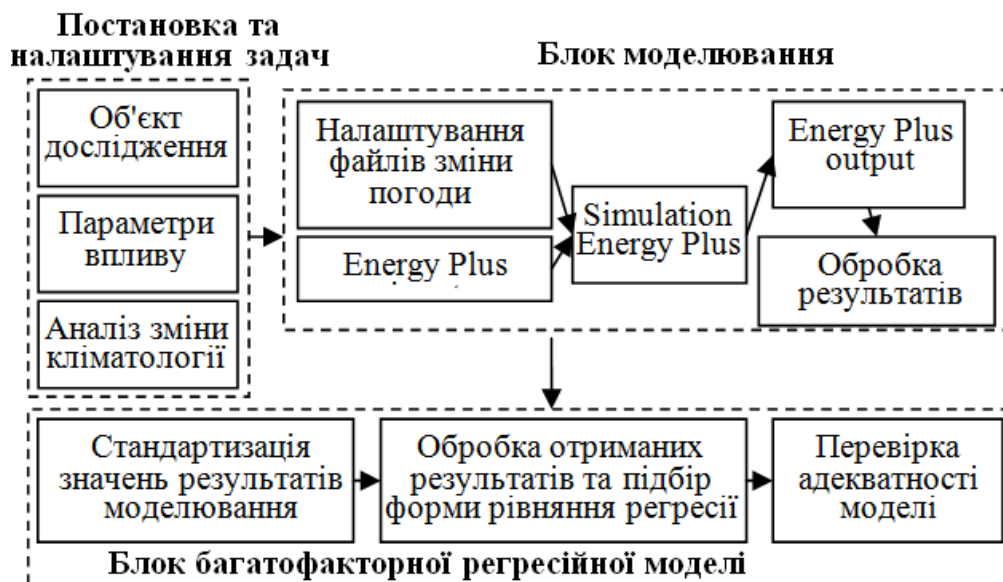


Рис. 9 – Схема аналізу та створення багатфакторної регресійної моделі та визначення нормалізованих коефіцієнтів рівняння регресії

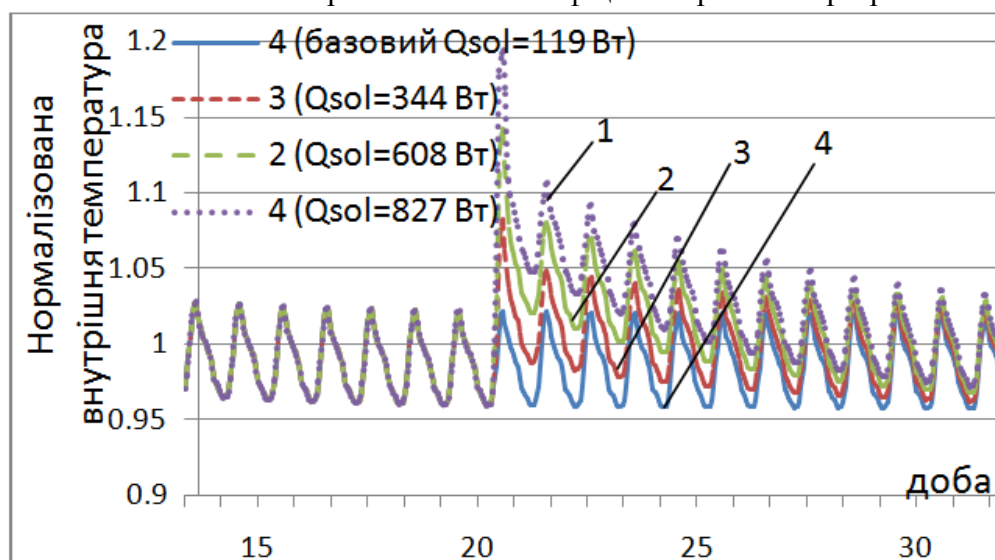


Рис. 10 – Добові коливання температури внутрішнього повітря приміщення орієнтованого на південь при збуренні сонячних теплонадходжень

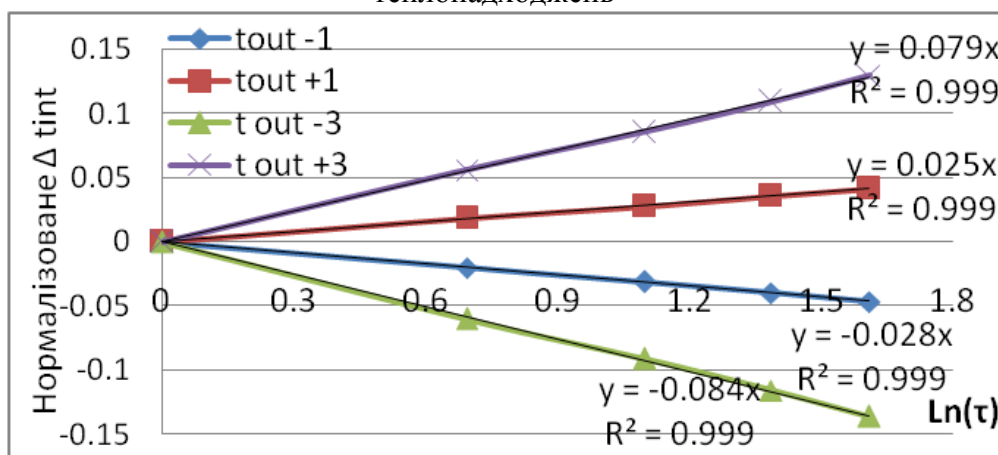


Рис. 11 – Нормалізована зміна внутрішньої температури повітря в логарифмічних координатах

нього повітря, рівня теплонадходжень від системи опалення та кратності повітрообміну обрано тип зміни на наступну добу, коли для подібного профіля погодиної зміни середнє за добу значення змінюється у межах заданого діапазону. Кількаденний профіль зміни факторів та відповідна реакція температури внутрішнього повітря ві-

дозволяє отримати достатньої точності, виділити вагомість впливових параметрів. Для побудови регресійної залежності, яка до того ж може враховувати історію зміни та інерцію впливу параметрів на енергетичний стан будівлі, в роботі використано імітаційне моделювання групи репрезентативних приміщень розташованих на різних поверххах будівлі Пн та Пд орієнтації, виділених на основі аналізу експериментальних досліджень. Схему проведення досліджень та створення багатфакторної регресійної моделі на базі імітаційного моделювання наведено на рис. 9.

Для узагальнення регресійної залежності в роботі сформовано чотири, представлені в безрозмірному вигляді, фактори. Для визначення впливовості факторів проводиться параметричний аналіз та встановлюється діапазон зміни кожного з них. Для трьох з них: температури зовніш-

дображаються як накладання у часі, усереднених за добу, характеристик моделювання. При одноденному збуренні сонячної радіації з усередненим значенням \tilde{Q}_{sol} зміна добових коливань внутрішньої температури повітря показана для південної орієнтації зовнішнього огороження на рис. 10. Для цього фактора кількадечний профіль визначався як послідовність добових значень. Тривалість ефекту збурення для всіх факторів розповсюджується на 5-6 діб. На рис. 11 наведено залежність зміни середньодобових значень внутрішньої температури повітря в нормалізованих одиницях від логарифму натурального номеру доби після внесення різних збурень зовнішньої температури.

На основі імітаційного моделювання побудовано лінійну (вираз (1)) та нелінійну (вираз (2)) багатофакторні регресійні моделі для прогнозування температурного стану або рівня опалення (вираз (3)) будівлі:

-лінійна багатофакторна регресія для прогнозування температури повітря, враховує 3 доби передісторії

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int,i} = & -0,031 + 1,058\tilde{t}_{int,i-1} + 0,251(\tilde{t}_{out,i} - \tilde{t}_{out,i-1}) + 0,116(\tilde{t}_{out,i-1} - \tilde{t}_{out,i-2}) + \\ & + 0,083(\tilde{t}_{out,i-2} - \tilde{t}_{out,i-3}) - 0,41(\tilde{n}_i - \tilde{n}_{i-1}) - 0,164(\tilde{n}_{i-1} - \tilde{n}_{i-2}) - 0,101(\tilde{n}_{i-2} - \tilde{n}_{i-3}) + \\ & + 0,1187(\tilde{Q}_{sol,i} - \tilde{Q}_{sol,i-1}) + 0,142(\tilde{Q}_{sol,i-1} - \tilde{Q}_{sol,i-2}) + 0,09(\tilde{Q}_{sol,i-2} - \tilde{Q}_{sol,i-3}) + \\ & + 0,341(\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) + 0,102(\tilde{Q}_{i-1} - \tilde{Q}_{i-2}) + 0,071(\tilde{Q}_{i-2} - \tilde{Q}_{i-3}), \end{aligned} \quad (1)$$

-нелінійна багатофакторна регресія для прогнозування температури повітря, враховує 5 діб передісторії

$$\begin{aligned} \tilde{t}_{int,i} = & \tilde{t}_{int,i-1} + A_{tout} f_1(\tilde{t}_{out}) + A_Q(\tilde{Q}_i - \tilde{Q}_{i-1}) \ln 2 + A_Q f_2(\tilde{Q}) + A_n f_3(\tilde{n}) + \\ & + A_{Qsol1} \{ (\tilde{Q}_{sol,i} - \tilde{Q}_{sol,i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol,i-1} - \tilde{Q}_{sol,i-2}) \ln \frac{i}{i-1} \} + A_{Qsol2} f_4(\tilde{Q}_{sol}), \end{aligned} \quad (2)$$

- нелінійна багатофакторна регресія для прогнозування рівня опалення, що враховує 5 днів передісторії

$$\begin{aligned} \tilde{Q}_i = & \tilde{Q}_{i-1} - 1,44 f_2(\tilde{Q}) + \frac{1,44}{A_Q} (\tilde{t}_{int,i} - \tilde{t}_{int,i-1}) - \frac{A_{tout}}{0,69 A_Q} f_1(\tilde{t}_{out}) - \frac{A_n}{0,69 A_Q} f_3(\tilde{n}) - \\ & - \frac{A_{Qsol1}}{0,69 A_Q} \{ (\tilde{Q}_{sol,i} - \tilde{Q}_{sol,i-1}) \ln 2 + (\tilde{Q}_{sol,i-1} - \tilde{Q}_{sol,i-2}) \ln \frac{i}{i-1} \} + \frac{A_{Qsol2}}{0,69 A_Q} f_4(\tilde{Q}_{sol}), \end{aligned} \quad (3)$$

де i - порядковий номер доби, для якої проводяться розрахунки,

j - порядковий номер доби передісторії,

k - номер доби передісторії,

\tilde{t}_{int} - середньодобова температура внутрішнього повітря,

\tilde{t}_{out} - середньодобова температура зовнішнього повітря;

\tilde{Q} - рівень опалення,

\tilde{n} - кратність повітрообміну;

\tilde{Q}_{sol} - середньодобові сонячні теплонадходження до кімнати;

f - функціональні комплекси розглянутих факторів з урахуванням мінливості передісторії впливу.

Наприклад, $f_1 = A_{tout} \{ (\tilde{t}_{out,i} - \tilde{t}_{out,i-1}) \ln 2 + \sum_{j=i-k, k=2}^n (\tilde{t}_{out,j} - \tilde{t}_{out,j-1}) \ln \frac{i-j+1}{(i-1)-j+1} \}$.

Для розглянутого типу будівлі коефіцієнти регресії мають наступне значення: $A_{tout} = 0,356$; $A_Q = 0,418$; $A_n = -0,541$; $A_{Qsol1} = 0,197$; $A_{Qsol2} = -0,045$.

Адекватність отриманих регресійних моделей оцінюється скорегованим коефіцієнтом детермінації (R^2), що становить 0,994 - лінійна, 0,981 - нелінійна; 0,88 - опалення; середня розбіжність значень моделювання зі значеннями, отриманими з рівняння регресії, не перевищує 0,4 °C для нелінійної та 0,6 °C - для лінійної, а середньоквадратична похибка становить 0,006 для нелінійної та 0,013 - для лінійної; критерій Фішера (F-критерій) 1324,3 для нелінійної та 4112,1 для лінійної. Перевірено значимість знайдених коефіцієнтів регресії (вирази (1)-(3)) на основі критерія Стюдента. Отримані регресійні моделі перевірені для кліматичних даних січня місяця

для м.Київ за даними IWEC. Моделювання для перевірки проводилось в імітаційній моделі E+ (рис. 12). Нелінійна багатофакторна регресія дозволяє використовувати один коефіцієнт при кожному з факторів незалежно від кількості діб врахування передісторії зміни. Аналіз нелінійної регресійної моделі (вираз (3)) показав, що для їх визначення достатньо по одному модельному експерименту. Коефіцієнти в рівнянні регресії показують вагомість впливу факторів.

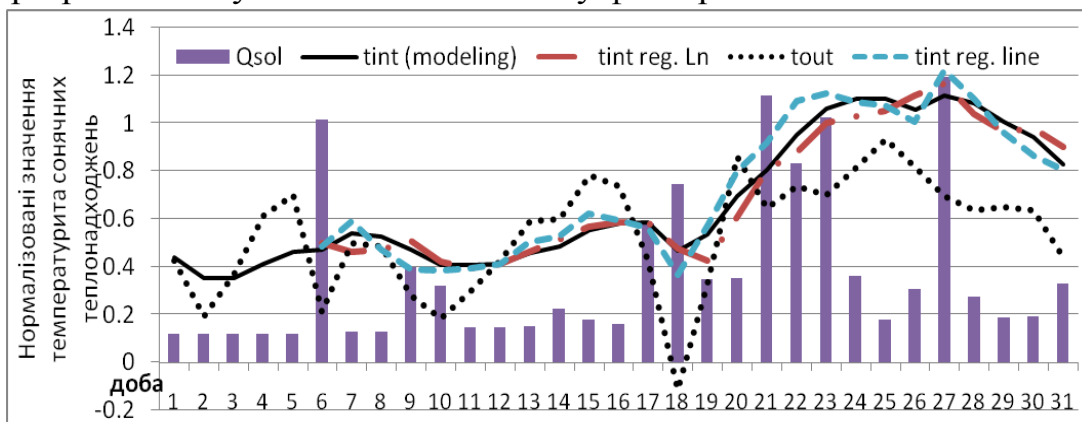


Рис. 12 – Прогнозне значення внутрішньої температури повітря в залежності від зовнішньої температури та сонячних теплонадходжень в зону кімнати в нормалізованих одиницях для січневих даних IWEC

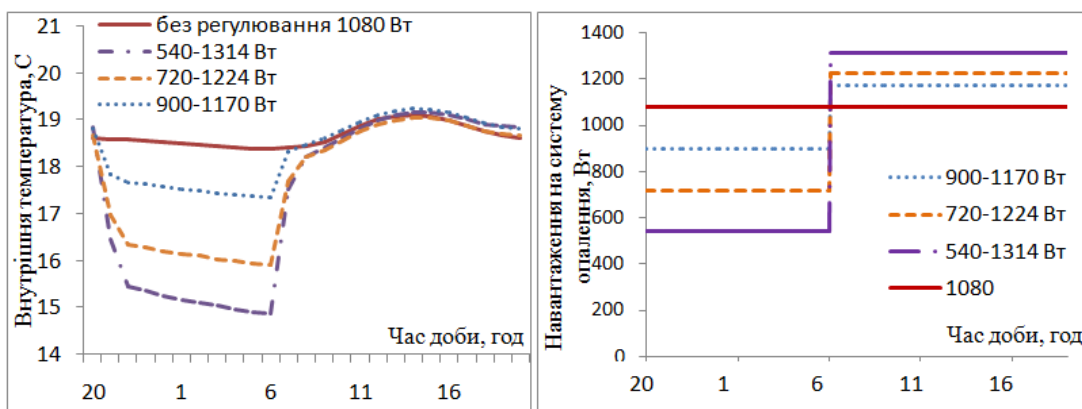


Рис. 13 – Добова зміна температури внутрішнього повітря (а) для різних графіків опалення (б) з постійним зниженням температури в нічні години

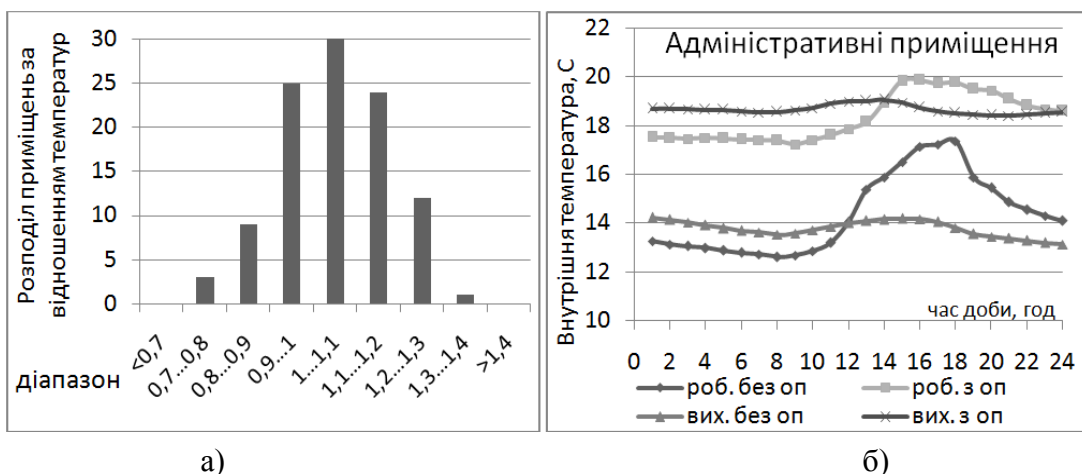


Рис. 14 – Розподіл відношення температур (а), динаміка зміни внутрішньої температури приміщень без та з опаленням у вихідні та робочі дні (б) для адміністративних приміщень північної сторони будівлі

переривчастому опаленні для типової доби грудня.

При введенні пониження рівня опалення в неробочі години для огорожень характерних масовій забудові, стабілізація графіка зміни внутрішньої температури повітря досягається на 6-8 день, при цьому знижується внутрішня температура повітря

В розглянутому діапазоні зміни параметрів їх вплив на температуру внутрішнього повітря зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зов-

нішня температура, сонячні теплонадходження.

У четвертому розділі визначено локальні та інтегральні показники енергетичного стану та енергетичної ефективності розглянутих громадських будівель. На базі імітаційного моделювання в EnergyPlus проведено аналіз теплового стану енергетичної системи будівлі, розташованої в м. Києві, при пер-

на 1,5–2 °С. Для забезпечення комфортної температури в робочі години потрібно збільшувати рівень опалення від базового на величину, яка залежить від глибини провалу в неробочі години (рис. 13). При щоденному провалі температури повітря в приміщенні на 2, 3, 4°С заощаджується 2, 6, 8% тепла, відповідно. Для забезпечення комфортного рівня температури на початок робочих годин (збільшення глибини провалу) вводили форсування системи опалення. При цьому досягається економія 5, 7, 9%, відповідно.

Проведено експериментально-розрахункове визначення інтегральних та розсереджених характеристик теплового та енергетичного стану будівлі. На базі багаторічних спостережень (2003-2017 рр.) отримано інтегральні (приклад на рис. 14,а) та локальні (рис. 14,б) дані по розподілу температур в приміщеннях багатоповерхової будівлі навчального корпусу в залежності від їх розташування, використання та забезпечення рівня опалення. На основі отриманих даних виділено репрезентативні групи приміщень, в яких досліджувався погодинний локальний розподіл температури (рис. 14,б). Використовуючи інтегральні характеристики розподілу температури повітря та поверхонь радіаторів створено регресійну залежність для розподілу надходжень в кімнату від системи опалення.

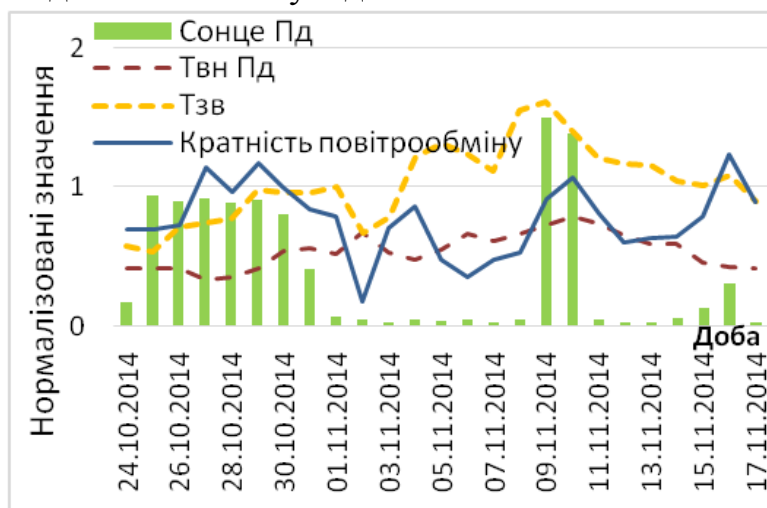


Рис. 15 – Розрахункове нормалізоване значення кратності повітрообміну для навчальних аудиторій в залежності від кліматичних умов та кратності повітрообміну (год⁻¹)

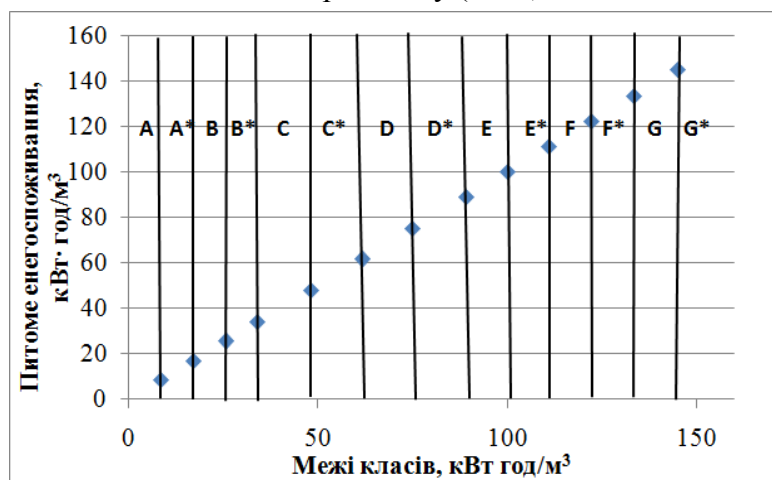


Рис. 16 – Нерівномірна шкала енергетичної сертифікації громадських будівель на 14 класів

Поєднання розрахункових та експериментальних даних використано для визначення кратності повітрообміну на основі створеної багатofакторної регресійної моделі (вираз (1)) та фактичних значень внутрішньої температури, рівня опалення, сонячних теплонадходжень. На прикладі приміщення 6 поверху, орієнтованого на Пд, для розглянутого інтервалу часу, кратність повітрообміну знаходилась в діапазоні 0,2....2 год⁻¹ для обраних приміщень (для Пд, рис. 15), на базі розрахункових методів ASHRAE діапазон зміни кратності аналогічний.

В Україні діють два стандарти до визначення класу енергоефективності будівель. Енергетична сертифікація за нерівномірною шкалою наведена в стандарті ДСТУ Б EN 15217:2013 (відсутні реперні точки для побудови шкали) та рівномірною шкалою ДБН В.2.6-31:2016, яка знайшла застосування в країні.

Для групи 60 громадських будівель, розташованих в містечках та

селах Кіровоградської, Вінницької та Львівської областей, проведено аналіз зміни при термомодернізації енергетичної ефективності, та виходячи з особливостей розташування та функціонування, обгрунтована побудова шкали енергетичної сертифі-

кації. Заходи, які впроваджуються на об'єктах, не завжди дають можливість достатньо зменшити питоме енергоспоживання, тому енергетична сертифікація за ДСТУ EN 15217:2013 та ДБН В.2.6-31:2016 призводить до відсутності переходу з класу в клас. При побудові шкали енергетичної сертифікації будівель на розкид меж класів енергоефективності впливає співвідношення фактичних R_s та нормативних R_r значень енергоспоживання. Варіація величини R_r більше впливає на розподіл інтервалів у верхній частині шкали, а зміна R_s – у нижній. Крім того, величина R_s , при зміні співвідношень R_r/R_s , впливає на величину загального інтервалу шкали.

На основі даних розглянутих будівель визначені реперні точки R_s шкали, (рис. 16), що відповідає підходам стандарту ДСТУ Б EN 15217:2013, і для оцінки впроваджених заходів рекомендовано розбити кожен клас на підкласи, тобто запропонована нова шкала на 14 класів. Побудована шкала енергетичної сертифікації будівель використана в проекті УФСІ, що підтверджено відповідним актом.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить нові науково обґрунтовані результати застосування та подальшого розвитку методів і засобів оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динаміки умов середовища. У процесі виконання роботи отримано наступні науково-практичні результати:

1. Для оцінювання енергоефективності будівель отримали розвиток математичні моделі та методи їх використання для визначення показників енергоефективності за рахунок уточнення розділення теплоінерційних характеристик огорожень будівлі, зміни погодних умов, що дозволяє зменшити розбіжності визначення енергопотреби в умовах країн з різкоконтинентальним кліматом.

2. Визначено умови застосування та проведено порівняння стаціонарних, квазістаціонарних та динамічних методів визначення енергетичних характеристик будівель для різних часових інтервалів розрахунку і баз кліматології.

Динамічні методи E+ та 5R1C (погодинний розрахунок) з даними кліматології IWEC дають майже однакове значення потреби для опалення, відмінність до 4-8%, в режимі охолодження – до 16-18%. Порівняння цих даних для періоду опалення з результатами стаціонарного за ДСТУ-Н Б А.2.2-5:2007 та квазістаціонарного за ДСТУ Б А.2.2-12:2015 методів розрахунку, в яких використані дані будівельної кліматології України, дає відмінність до 15% та 15-25%, відповідно, а для охолодження за квазістаціонарним методом 20-30%.

3. Розроблені методичні основи та створені математичні моделі для прогнозування та регулювання рівня опалення на основі регресійного аналізу, які дозволяють врахування передісторії зміни чотирьох груп внутрішніх та зовнішніх факторів впливу, що збільшує точність прогнозу. Нелінійна багатофакторна регресія дозволяє використовувати один коефіцієнт при кожному з факторів незалежно від кількості діб врахування передісторії зміни параметру, для визначення яких достатньо по одному модельному експерименту. Точність регресійних моделей оцінювалась скорегованим коефіцієнтом детермінації (R^2), що становить 0,994 - лінійна, 0,981 - нелінійна; 0,88 - опалення.

4. Проведено параметричний аналіз факторів та визначено вагомість та динаміку їх впливу на температуру внутрішнього повітря, що зменшується в ряду: кратність повітрообміну, рівень опалення, зовнішня температура повітря, сонячні теплонадходження, що дозволяє оцінити вплив параметрів на баланс будівлі характерній масовою забудові України.

5. Уточнено режими переривчастого опалення будівель з врахуванням теплоінерційних та погодних умов. Економія при впровадженні рекомендованої глибини

зниження температури повітря в неробочі години може досягти до 9% для типових умов грудня. В цілому для громадського сектору будівель України застосування режимів переривчастого опалення протягом опалювального сезону з врахуванням динаміки зміни умов середовища дозволить досягти економії - до 3,6 млн. Гкал.

6. На базі багаторічних спостережень отримано дані по розподілу температур в приміщеннях багатоповерхової будівлі навчального корпусу в залежності від їх розташування, використання та забезпечення рівня опалення, що дозволило розвинути комплексний підхід на основі поєднання експериментальних методів визначення розподілу температур в приміщеннях будівлі та математичних моделей локального та часового розосередження характеристик, що дозволяє визначити фактичні енергетичні характеристики (кратність повітрообміну). Для фактичних умов розглянутого інтервалу часу кратність повітрообміну знаходилась в діапазоні $0,2 \dots 2 \text{ год}^{-1}$ для репрезентативних приміщень.

7. Запропоновано та обгрунтовано нову шкалу енергетичної сертифікації громадських будівель, розташованих у невеликих містах та селах, що дозволяє провести оцінку енергофактивності при реалізації енергозберігаючих проектів з врахуванням особливостей розташування та функціонування об'єктів зі збільшенням кількості класів шляхом розбиття на підкласи. Запропонована шкала використана в проекті УФСІ для оцінки поступу від впровадження енергозберігаючих заходів.

8. Результати роботи використані УФСІ, ДП «НДІ будівельних конструкцій», службами енергетичного менеджменту СумДУ та КПП ім. Ігоря Сікорського, у навчальному процесі на кафедрі теплотехніки та енергозбереження КПП ім. Ігоря Сікорського.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Сплавська В.О., Суходуб І.О., Шевченко О.М., Шовкалюк М.М. Управління ефективністю енерговикористання у вищих навчальних закладах: монографія / під заг. ред. В.І. Дешка. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 186с. (колективна монографія). *Автор провів класифікацію програмних продуктів для аналізу енергетичних характеристик будівлі або групи будівель.*

2. Deshko V., Sukhodub I., Bilous I. Mathematical models for determination of energy need for heating. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*, 2017. Vol. 2. P. 45-51. (іноземне видання). *Автору належить розробка моделей для визначення енергопотреби будівлі.*

3. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of specific energy need for heating and cooling of the administrative building. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7 (4.3). P. 325-330. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**). *Автором проведено порівняння методик визначення питомої потреби на опалення та охолодження для південного регіону України.*

4. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Building inside air temperature parametric study. *Magazine of Civil Engineering*. 2016. Vol. 8. P. 65–75. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**). *Автором проведено параметричний аналіз впливу внутрішніх та зовнішніх впливових параметрів на внутрішню температуру повітря.*

5. Bilous I.Yu., Deshko V.I., Sukhodub I.O. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327-336. (іноземне видання, включене до бази даних **Scopus**). *Автором створено нелінійну багатофакторну регресійну залежність для прогнозування рівня опалення та/або внутрішньої температури повітря в будівлі.*

6. Deshko V., Sukhodub I., Bilous I. Mathematical models for determination of specific energy need for heating used in Ukraine. *Journal of New Technologies in Environmental Science (JNTES)*. 2018. Vol. 1. P. 13-25. (іноземне видання). Автором проведено порівняння застосування різних підходів визначення питомої потреби на опалення в м. Києві.

7. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гончарук С.М., Гурська Ю.В. Комплексне дослідження енергетичних характеристик будівлі. *The scientific heritage*. 2017. Vol. 9. P. 63-68. (іноземне видання). Автором проведено комплексне дослідження кратності повітрообміну для репрезентативних приміщень будівлі ВНЗ.

8. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. *Будівельні конструкції: Міжсвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2014. № 80. С. 68 – 72. Автором проведено огляд математичних моделей будівель, що використовуються для оцінки енергоспоживання.

9. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Бази кліматології для визначення енергетичних характеристик будівель. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2017. №4. С. 67-73. (включене до бази даних **Index Copernicus**). Автор провів порівняння кліматичних баз даних для України.

10. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моніторинг температурного стану навчального корпусу. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2015. №2. С. 24-32. (включене до бази даних **Index Copernicus**). Автор провів частковий збір та аналіз фактичних інтегральних та локальних характеристик температурного стану навчального корпусу.

11. Дешко В.І., Шевченко О.М., Красовський О.П., Білоус І.Ю. Енергетична сертифікація будівель закладів соціальної сфери. *Науково-технічний, виробничий та інформаційно-аналітичний журнал «Наука та будівництво»*. 2016. №2. С. 14-20. Автором запропоновано шкалу для енергетичної сертифікації громадських будівель.

12. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Суходуб І.О. Моделювання сумісного впливу сонячної та теплової радіації на внутрішню температуру огорожень будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 24-31. (включене до бази даних **Ulrich's Periodical Directory**). Автором досліджено сумісний вплив сонячної радіації та власного теплового випромінювання стін на внутрішню температуру огорожень.

13. Дешко В.І., Буяк Н.А., Білоус І.Ю. Вибір теплового захисту та джерела тепла із врахуванням комфортних умов у будівлі. *Журнал "Вісник КНУТД"*. 2015. №5(90). С. 71-80. (включене до бази даних **Ulrich's Periodical Directory**). Автором створено математичну модель для дослідження комфортних умов у будівлі.

14. Соловей О.І., Шевченко О.М., Білоус І.Ю. Оцінка рівня ефективності енергоспоживання об'єктів житлового комплексу (на прикладі гуртожитків НТУУ «КПІ»). *Будівельні конструкції: Міжсвідомчий науково-технічний збірник наукових праць*. 2013. № 77. С. 293-297. Автором запропоновано та проведено групування будівель за рядом ознак при оцінці енергоефективності гуртожитків.

15. Шовкалюк М.М., Білоус І.Ю. Аналіз енергетичних і математичних показників і балансів навчального закладу з розробкою енергетичних заходів. *Науково-практичний журнал "Екологічні науки"*. 2014. №1(5). С. 108-115. Автором розроблено комплекс енергозберігаючих заходів виходячи з енергетичних балансів.

16. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*. 2016. №3 С. 97-104. (включене до бази даних **Index Copernicus**). Автором проведено динамічне моделювання різних режимів опалення.

17. Deshko V.I., Sukhodub I.O., Bilous I.Yu. Mathematical models for determination of energy need for heating. *II International Scientific-Technical Conference "Actual Problems Of Power Engineering, Construction And Environmental Engineering"* (23-25 November 2017, Kielce, Poland). Kielce: Kielce University of Technology, 2017. P. 33-40. *Автором розроблено математичні моделі будівлі для визначення енергопотреб на опалення.*

18. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі для визначення питомої енергопотреб на опалення та охолодження адміністративної будівлі. Міжнародна науково-технічна конференція «Технології та інфраструктура транспорту» (14-16 травня 2018 р., м. Харків). Харків: УкрДУЗТ, 2018. С. 89-91. *Автором створені математичні моделі кімнати для дослідження енергопотреб будівель в опаленні та/або охолодженні з річним, помісячним та погодинним кроками розрахунку.*

19. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Фактори температурних режимів приміщень в енергетичному менеджменті громадських будівель. II Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – REIMS' 15» (19-21 травня 2015 р., м. Київ). Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2015. С. 28. *Автором проведені дослідження температурних режимів приміщень навчального корпусу.*

20. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Шевченко О.М. Шкала визначення класу енергоефективності для закладів соціальної сфери. Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності" (14 квітня 2016 р., Одеса). Одеса: ОНАХТ, 2016. С. 71–73. *Автором проведено аналіз підходів визначення класу енергоефективності будівель.*

21. Дешко В.І., Білоус І.Ю., Гетманчук Г.О. Визначення кратності повітрообміну в залежності від зовнішніх та внутрішніх факторів. Міжнародна студентська науково-технічна КОНФЕРЕНЦІЯ «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання.» (26-27 квітня 2018 р., Тернопіль). Тернопіль: ТНТУ, 2018. С. 81-82. *Автором проведено аналіз методик визначення кратності повітрообміну в будівлі.*

АНОТАЦІЯ

Білоус І.Ю. Оцінювання енергоефективності будівлі в умовах динамічної зміни характеристик середовища. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" МОН України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена порівнянню, адаптації та розвитку методів оцінювання енергоефективності будівель на основі математичних моделей з врахуванням динаміки зміни умов середовища. Проведений аналіз нормативної бази щодо підходів визначення енергоефективності енергоспоживання в будівлях, підвів до врахування особливостей використання та розвитку динамічних методів розрахунку енергопотреб на опалення та/або охолодження.

Розроблено методику побудови регресійних багатофакторних моделей будівлі для прогнозування рівня опалення та/або внутрішньої температури повітря в приміщенні, що дозволяє враховувати теплоінерційні особливості огорожувальних конструкцій через врахування передісторії зміни факторів впливу.

Досліджені переривчасті режими опалення будівель на базі динамічних моделей та визначено можливий діапазон економії енергії для різних температурних графіків приміщень.

Запропоновані підходи визначення реперних точок для побудови шкал енергетичної сертифікації будівель з врахуванням особливостей їх функціонування та розміщення.

Ключові слова: енергопотреба, енергоефективність, будівлі, математична модель, температура, теплонадходження, кліматологія, енергетична сертифікація.

АННОТАЦИЯ

Белоус И.Ю. Оценка энергоэффективности здания в условиях динамического изменения характеристик среды. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 - Энергетические системы и комплексы. - Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского" МОН Украины, Киев, 2019.

Диссертация посвящена сравнению, адаптации и развитию методов оценки энергоэффективности зданий на основе математических моделей с учетом динамики изменения условий среды. Проведенный анализ нормативной базы относительно подходов определения энергоэффективности энергопотребления в зданиях, привел к учету особенностей использования и развития динамических методов расчета энергопотребности на отопление и/или охлаждения.

Разработана методика построения регрессионных многофакторных моделей здания для прогнозирования уровня отопления и внутренней температуры воздуха в помещении, которая позволяет учитывать теплоинерционные особенности ограждающих конструкций посредством предыстории изменения факторов влияния.

Исследованы прерывистые режимы отопления зданий на базе динамических моделей и определен возможный диапазон экономии энергии для различных температурных графиков помещений.

Предложены подходы определения реперных точек для построения шкал энергетической сертификации зданий с учетом особенностей их функционирования и размещения.

Ключевые слова: математическая модель, энергопотребление, энергоэффективность здания, температура, теплопоступления, климатология, энергетическая сертификация.

ABSTRACT

Bilous I.Yu. Estimation of building energy efficiency in conditions of environment characteristics dynamic change. - Manuscript.

The dissertation on completion of the candidate of technical sciences degree on specialty 05.14.01 - Energy systems and complexes. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the comparison, adaptation and development of methods for estimating energy efficiency of buildings on the basis of mathematical models taking into account the dynamics of changing environment conditions. A literature review of modern trends in the use of mathematical modeling and normative base on approaches to assessing buildings energy efficiency is performed. The need to reduce the time intervals of calculation is shown, taking into account the specifics of the use and development of dynamic methods for calculating energy need for heating and/or cooling.

The analysis of characteristics and modeling of building thermal state was carried out on the basis of various mathematical models for public buildings of various complexity, regional location, year of construction and conditions of operation. In the conditions of energy carrier efficient use, energy need for heating should be calculated taking into ac-

count hourly changes in climatic characteristics that cannot be realized in stationary models. Dynamic models for determining buildings energy performance require the use of hourly climatic data (for Ukrainian cities - typical year of the IWECC).

Mathematical models for the research of energy status of buildings use end-points characteristics of influence, such as air exchange rate, solar heat gains to the space area, and others, which require recalculation methods. The work summarizes the methodology for determining the air exchange rate, which depends on such data as wind speed, number of stories, orientation of the space (windward or leeward side), the integrity of the windows, based on ASHRAE techniques and other researchers' papers. Solar heat gains are calculated using Duffy's techniques and the detailed calculation of the E + software product on the vertical surface derived from the hourly solar heat gains data on a horizontal surface from the international climate weather file IWECC. Averaged monthly obtained results are compared with the normative climatology of Ukraine for the city of Kyiv and Odesa. The difference is 40% in the winter and 30% in summer for Kyiv, and for Odesa it is up to 50%.

The peculiarities of the considered methods use and application of various averaging time intervals of the initial parameters are determined as an influential parameter on the research results. Dynamic E + and 5R1C methods give almost the same value for energy need for heating, the difference is up to 4-8%, in cooling mode it is up to 16-18% with IWECC climatological data. Comparison of these data for the whole heating period with the results of stationary approach according to DSTU-N B A.2.2-5:2007 and quasi-stationary calculation method of DSTU B A.2.2-12:2015, which uses normative climatic data for Ukraine, gives a difference of up to 15% and 15 -25%, respectively, and for cooling by a quasi-stationary method the difference is 20-30%.

The method of creating multifactorial regressive models of the building thermal state for heating level of and internal room air temperature forecasting is developed, which allows to take into account thermal inertia features of envelope constructions and the history of influential parameters change. For generalization of regression dependence in work allocated four factors, presented in dimensionless form: the air exchange rate, outside air temperature, heating level, solar heat gains to the space.

The buildings intermittent modes of heating were investigated on the basis of dynamic models and the possible range of energy savings for different temperature schedules of premises was determined taking into account the recommended temperature difference during non-working hours, which is about 9%.

In the paper, the experimental and calculated determination of the integral and scattered characteristics of the thermal and energy state of the building is carried out on the basis of long-term observations (2003-2017). Data on temperature distribution in the premises of a multistory building of an educational facility were obtained, depending on their location, use and level of heating. The combination of calculated and experimental data allowed to determine the air exchange rate on the basis of the created multi-factor regression model and actual values of internal temperature, heating level and solar heat gains.

Ukraine has two standards for defining the buildings energy efficiency class. A new energy scale of 14 classes for buildings energy certification for public facilities located in small towns and villages is proposed, which is based on certain reference points and allows to assess the buildings energy efficiency when implementing energy-saving projects.

Key words: energy need, energy efficiency, buildings, mathematical model, temperature, heat gains, climatology, energy certification.